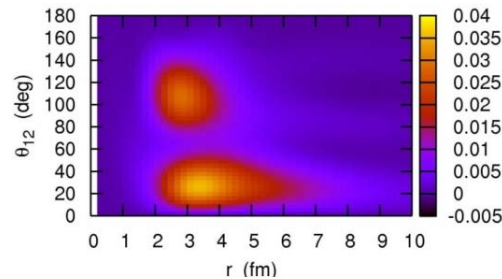
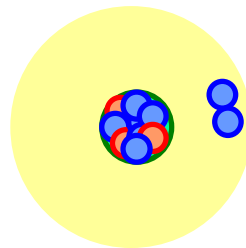


# Di-neutron 相関研究の現状 と今後の展開

萩野浩一（東北大学）



TOHOKU  
UNIVERSITY



1. *Di-neutron* 相関とは?
2. クーロン分解
3. 他のプローブ  
(核力分解、 $nn$ 運動量分布、対移行反応、ノックアウト反応、2中性子崩壊)
4. まとめ

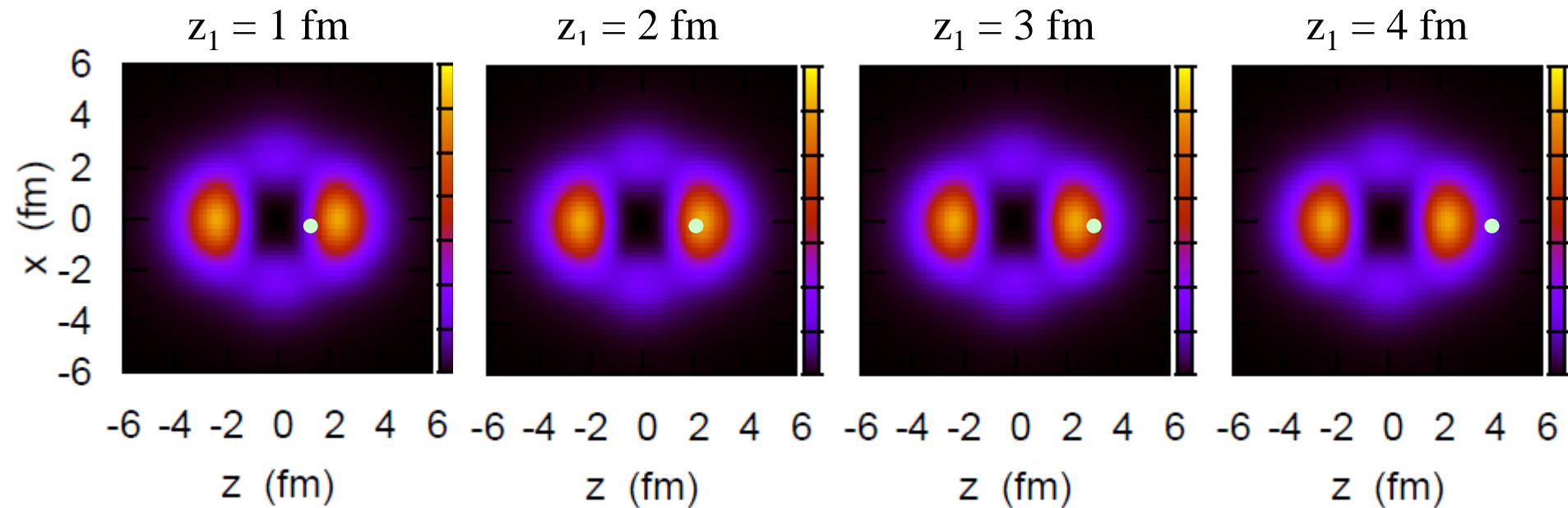
# Di-neutron 相関とは?

相関:  $\langle AB \rangle \neq \langle A \rangle \langle B \rangle$

例)  $^{18}\text{O} = ^{16}\text{O} + n + n$  cf.  $^{16}\text{O} + n$ : 3つの束縛状態 ( $1d_{5/2}$ ,  $2s_{1/2}$ ,  $1d_{3/2}$ )

i) 2中性子相関がない場合  $|nn\rangle = |(1d_{5/2})^2\rangle$

中性子1を  $z_1$  に置いたときの中性子2の分布:



✓ 2つの粒子が独立に運動

✓ 中性子1がどこにいても中性子2の分布は影響されない

$$\langle AB \rangle = \langle A \rangle \langle B \rangle$$

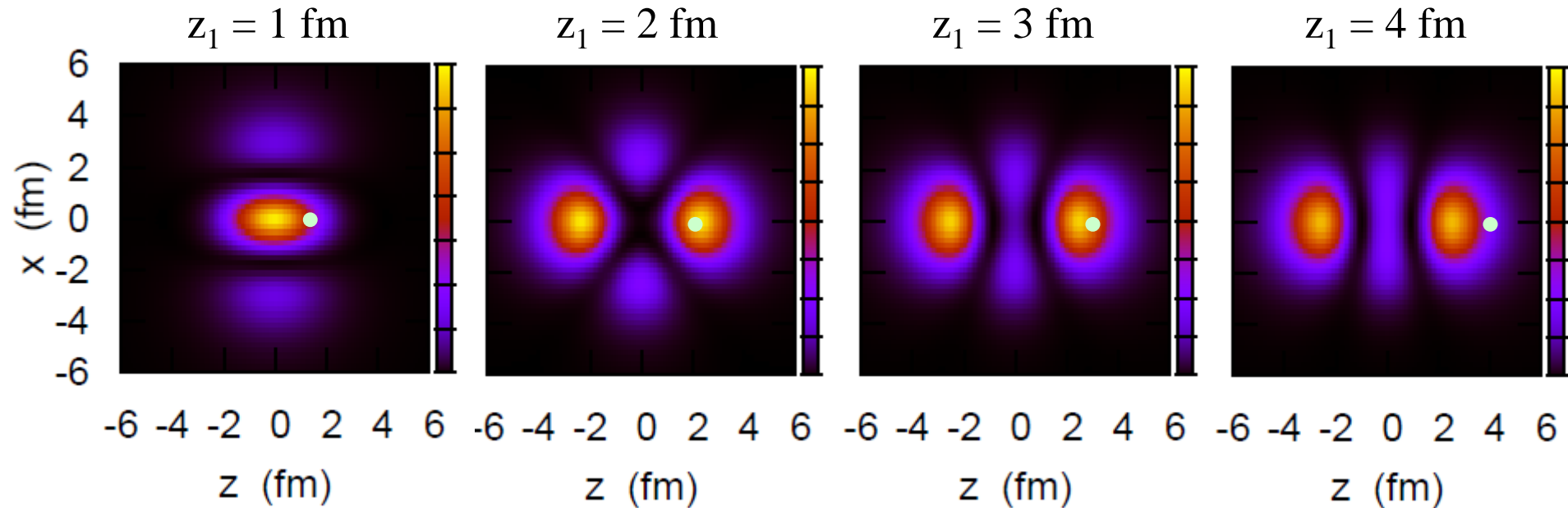
# Di-neutron 相関とは?

相関:  $\langle AB \rangle \neq \langle A \rangle \langle B \rangle$

例)  $^{18}\text{O} = ^{16}\text{O} + n + n$  cf.  $^{16}\text{O} + n$ : 3つの束縛状態 ( $1d_{5/2}$ ,  $2s_{1/2}$ ,  $1d_{3/2}$ )

ii) 2中性子相関が同パリティ状態(束縛状態)にのみ働く場合

$$|nn\rangle = \alpha |(1d_{5/2})^2\rangle + \beta |(2s_{1/2})^2\rangle + \gamma |(1d_{3/2})^2\rangle$$



✓ 中性子1とともに中性子2の分布が変化 (2中性子相関)

✓ ただし、中性子2は  $z_1$  と  $-z_1$  の両方にピーク

→ このようなものは di-neutron 相関とは言わない

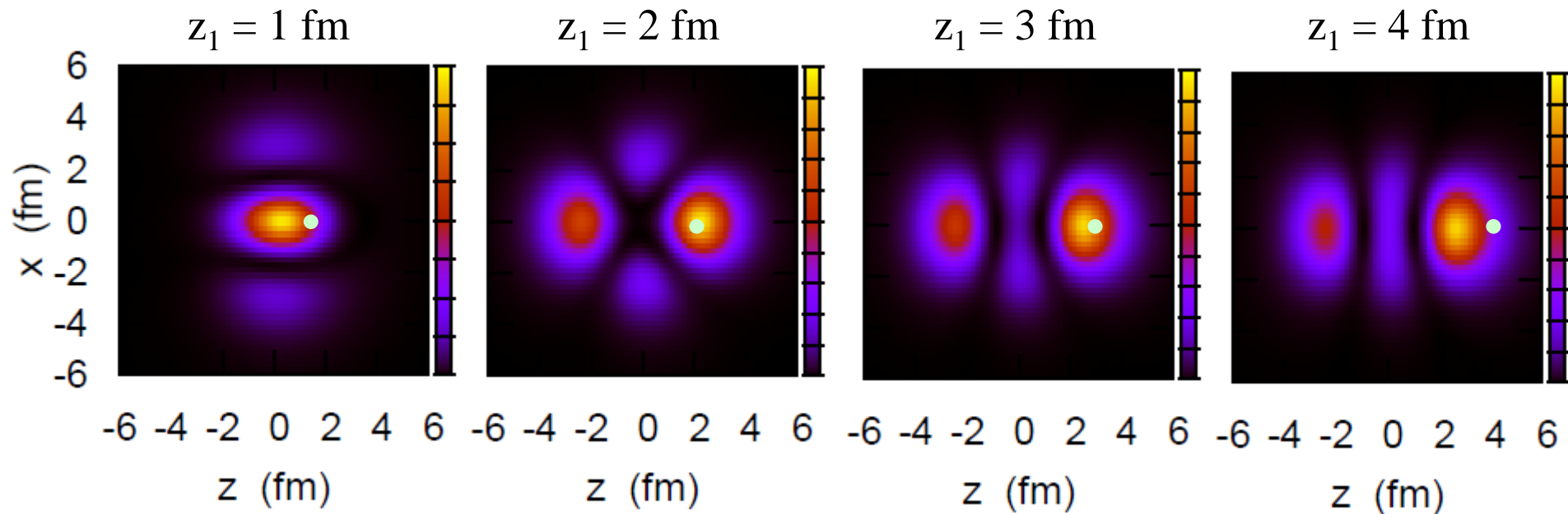
# Di-neutron 相関とは?

相関:  $\langle AB \rangle \neq \langle A \rangle \langle B \rangle$

例)  $^{18}\text{O} = ^{16}\text{O} + n + n$  cf.  $^{16}\text{O} + n$ : 3つの束縛状態 ( $1d_{5/2}$ ,  $2s_{1/2}$ ,  $1d_{3/2}$ )

iii) 2中性子相関が連続状態にも働く場合

$$|nn\rangle = \sum_{n,n',j,l} C_{nn'jl} |(nn'jl)^2\rangle$$



✓空間的な相関: 中性子2の密度は中性子1側にかたよる

✓パリティ混合が本質的な役割

(dineutron 相関)

cf. F. Catara, A. Insolia, E. Maglione, and A. Vitturi, PRC29('84)1091

## 2中性子は空間的に局在 (dineutron相関)

cf. Migdal, Soviet J. of Nucl. Phys. 16 ('73) 238

Bertsch, Broglia, Riedel, NPA91('67)123

### 弱束縛核

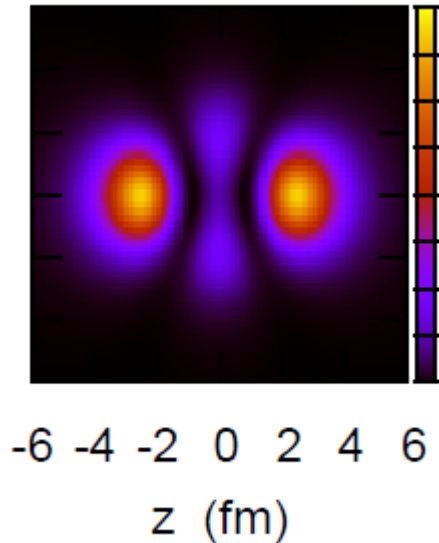
→連続状態のためにパリティ混合が起きやすい

+ 表面領域における対相関力の増大

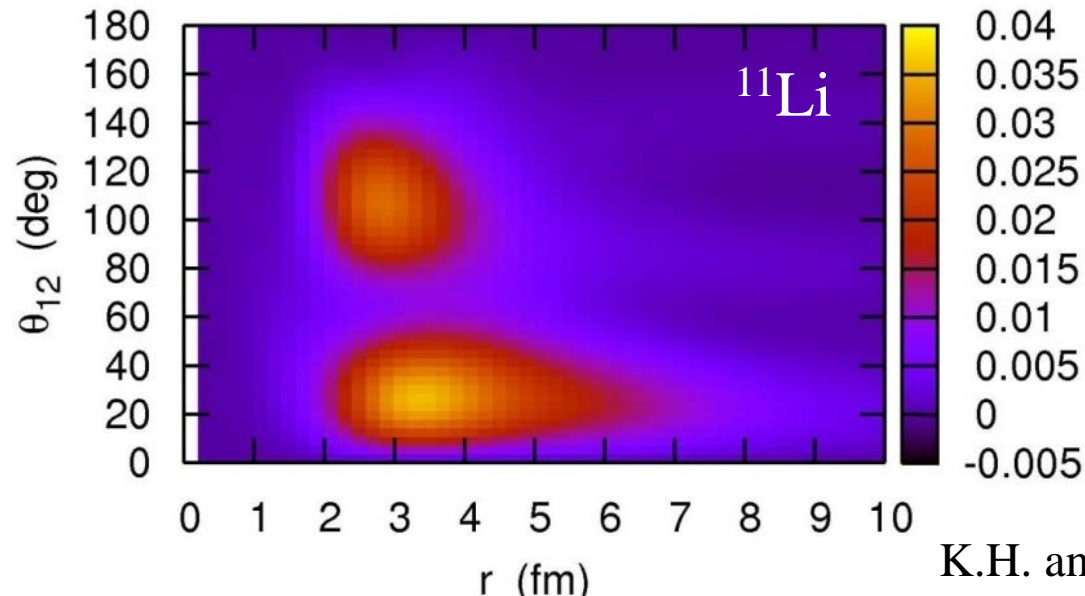
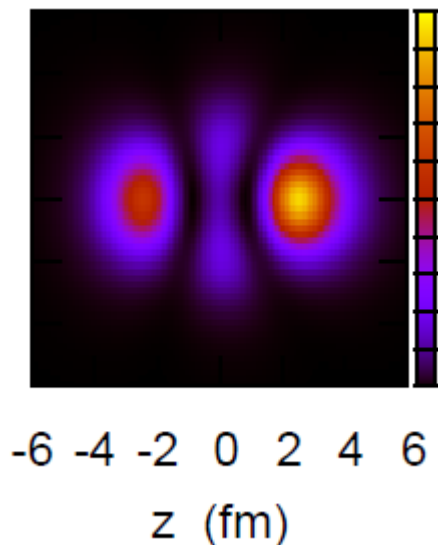
→dineutron 相関が増幅される

cf. - Bertsch, Esbensen, Ann. of Phys. 209('91)327

- M. Matsuo, K. Mizuyama, Y. Serizawa,  
PRC71('05)064326



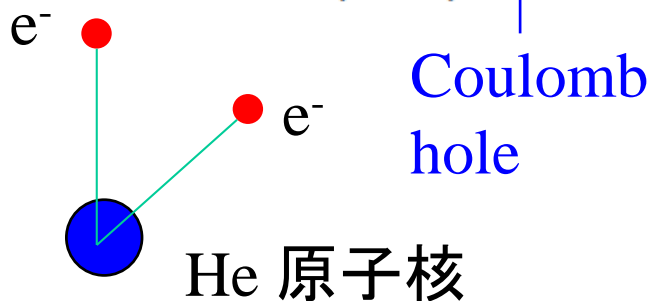
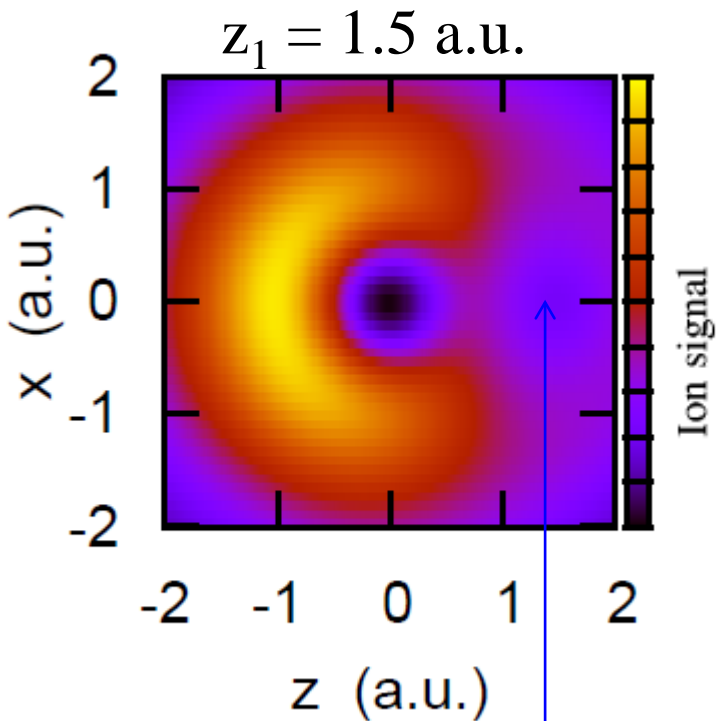
パリティ混合



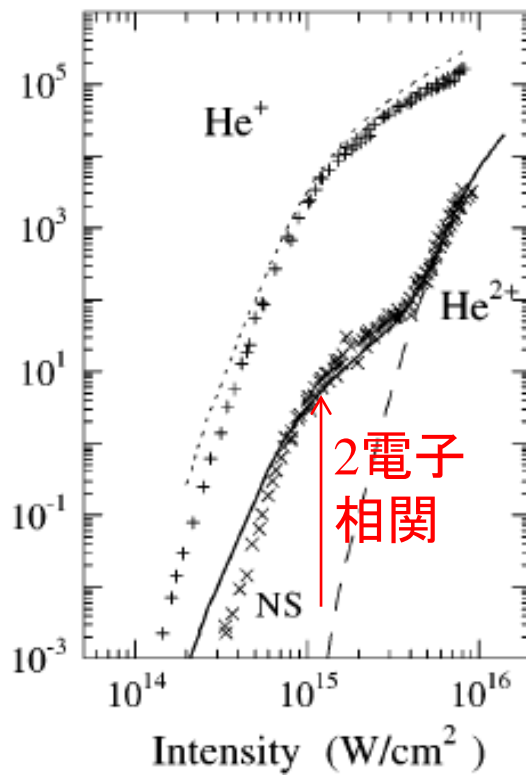
K.H. and H. Sagawa,  
PRC72('05)044321

# どのようにプローブするか?

cf. He 原子の場合

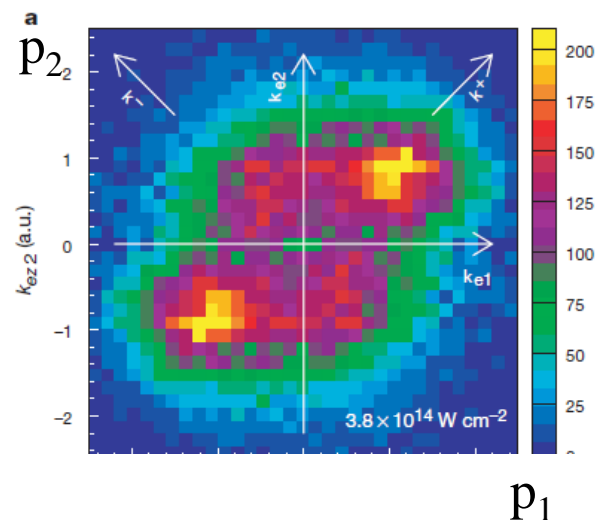


レーザー照射による2重イオン化



J.B. Watson et al.,  
PRL78('97)1884

放出2電子の  
運動量分布  
(Ar イオンの場合)



Th. Weber et al.,  
Nature 405 ('00) 658

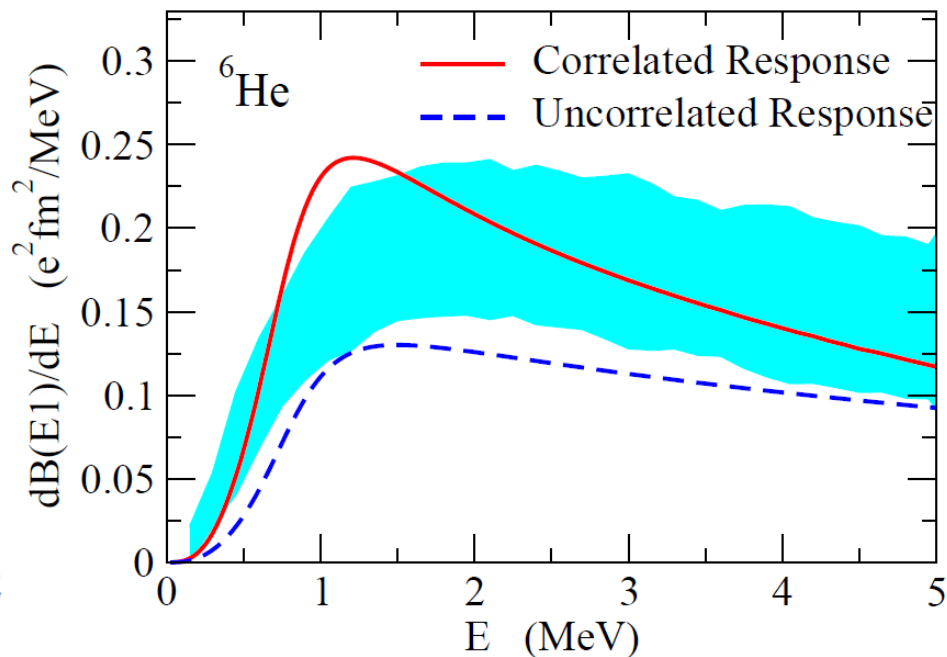
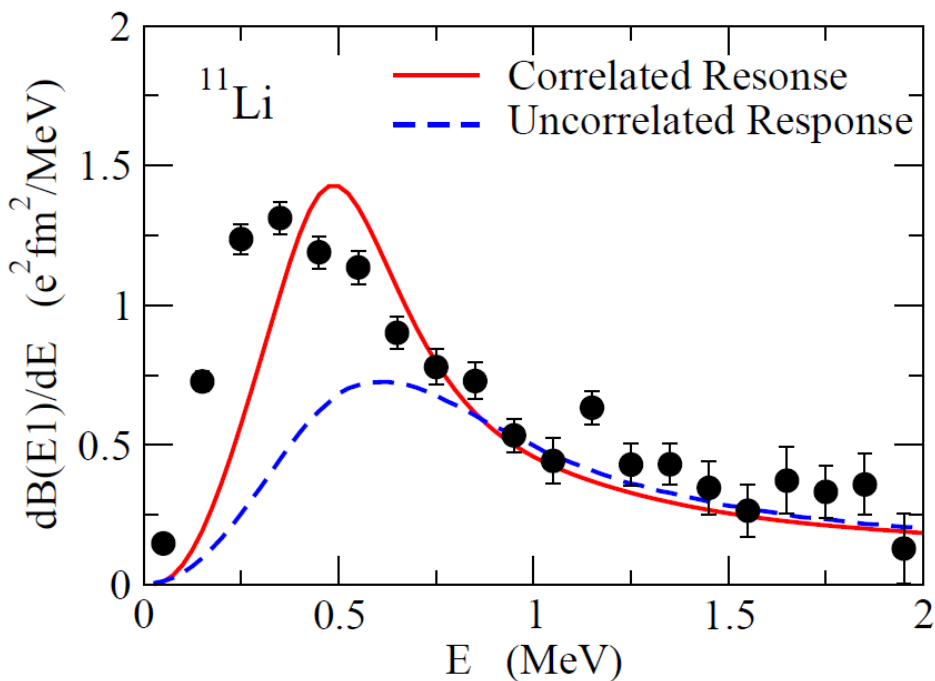
明らかな2電子相関  
の効果

(ただし、基底状態における相関より励起状態における相関が主)

「クーロン再散乱」 →

# 2中性子ハロー核のクーロン分解

外的刺激を与えて放出2粒子(2中性子)を観測する → クーロン分解



実験:

T. Nakamura et al., PRL96('06)252502

T. Aumann et al., PRC59('99)1252

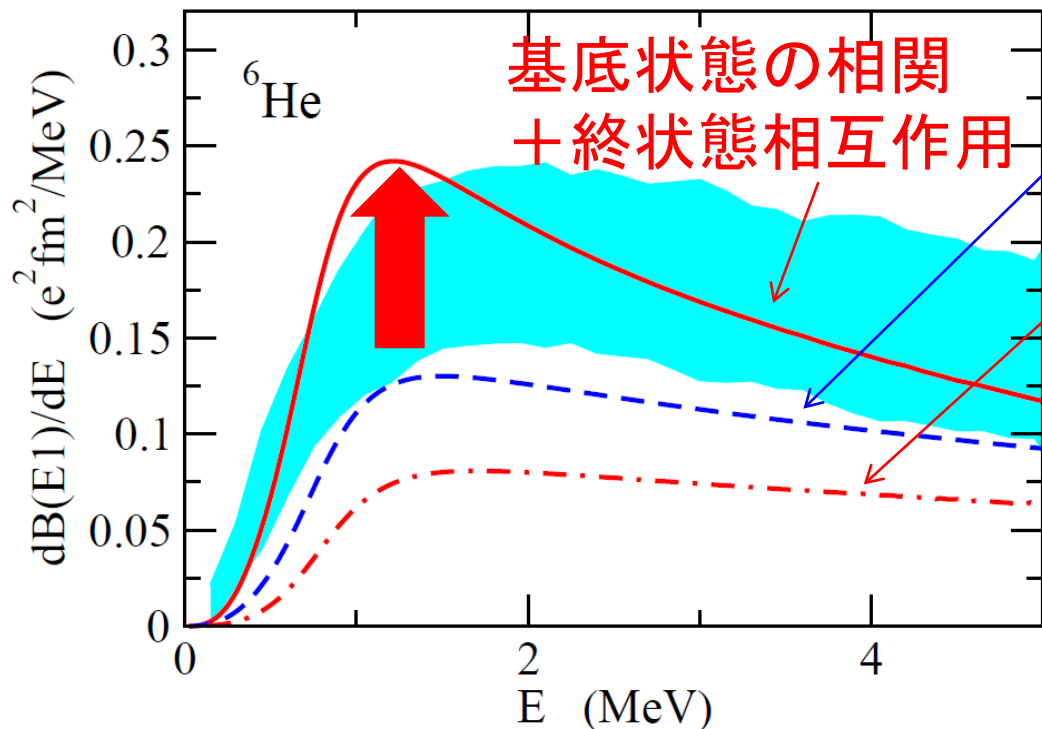
三体模型計算:

K.H., H. Sagawa, T. Nakamura, S. Shimoura, PRC80('09)031301(R)

cf. Y. Kikuchi et al., PRC87('13)034606 ←  $^9\text{Li}$  の構造

他にも  $^{22}\text{C}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^{19}\text{B}$  など (T. Nakamura et al.)

# 基底状態の相関? or 励起状態の相関?



基底状態の相関のみ  
(終状態での nn 相互作用はゼロ)

基底状態: odd-1 のみ  
(di-neutron 相関はなし)  
+ 終状態相互作用

cf. クラスタ和則

$$B_{\text{tot}}(E1) \sim \frac{3}{\pi} \left( \frac{Z_{ce}}{A_c + 2} \right)^2 \langle R_{c-2n}^2 \rangle$$

✓ 終状態相互作用を切ると強度分布が高エネルギー側にシフト  
→ 低エネルギー領域では強度分布が小さくなる  
(ただし、和則があるので全強度は変化なし)

✓ 基底状態の di-neutron 相関を切ると E1 強度は小さくなる

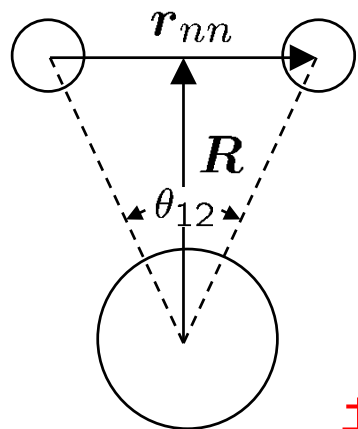
←  $R_{c-2n}$  が小さくなるため (3.63 → 2.61 fm)



**基底状態の相関と励起状態の相関の両方が重要**



# ボロミアン原子核の幾何学



## クラスター和則

$$B_{\text{tot}}(E1) \sim \frac{3}{\pi} \left( \frac{Z_{ce}}{A_c + 2} \right)^2 \langle R^2 \rangle$$

基底状態の相関のみが反映

$nn$  間角度の「実験値」

$$\sqrt{\langle R^2 \rangle} \longleftarrow B_{\text{tot}}(E1)$$

$$\sqrt{\langle r_{nn}^2 \rangle} \longleftarrow \text{matter radius or HBT}$$

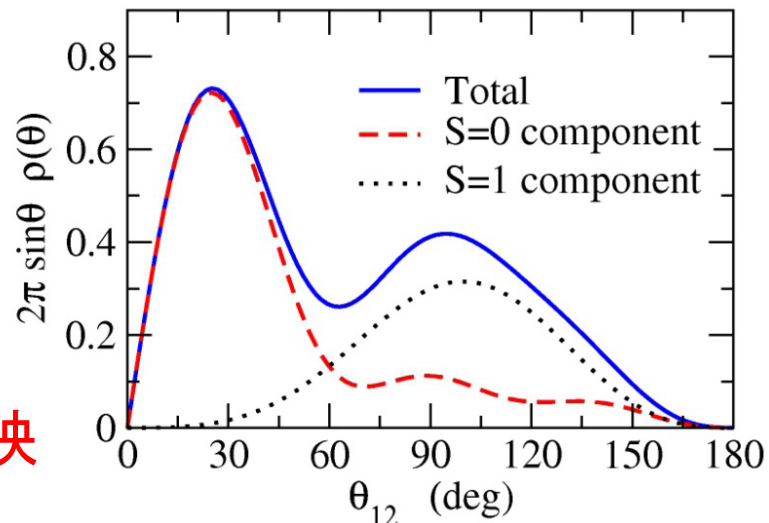
$$\begin{aligned} \langle \theta_{12} \rangle &= 65.2 \pm 12.2 \text{ } (^{11}\text{Li}) \\ &= 74.5 \pm 12.1 \text{ } (^6\text{He}) \end{aligned}$$

K.H. and H. Sagawa, PRC76('07)047302

cf. T. Nakamura et al., PRL96('06)252502

C.A. Bertulani and M.S. Hussein, PRC76('07)051602

## 3体模型計算



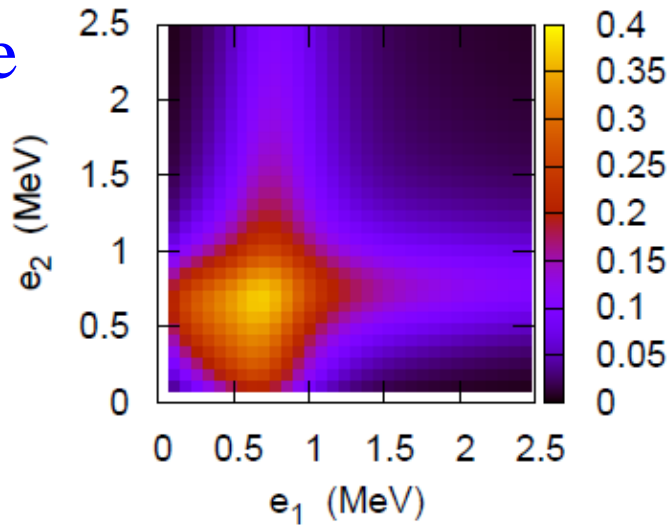
$$\langle \theta_{12} \rangle = 65.29 \text{ deg.}$$

$\langle \theta_{12} \rangle$  が90度より著しく小

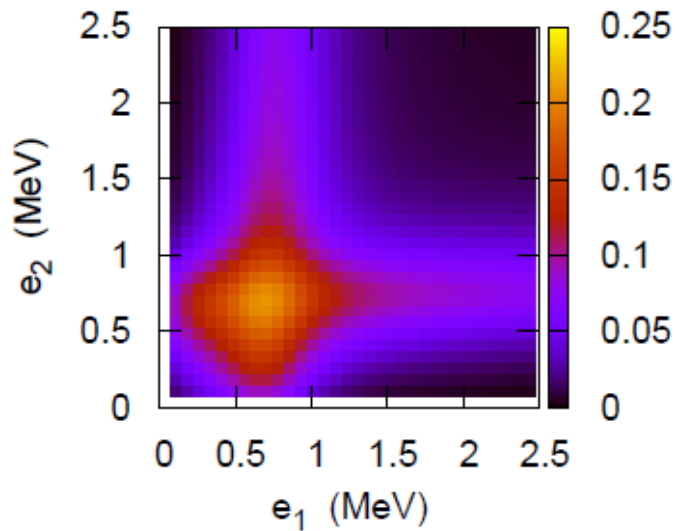
↓  
di-neutron 相関を示唆  
(ただし、大きい角度の成分が混ざって見えている)

## 放出2中性子のエネルギー分布

${}^6\text{He}$



↓  $v_{nn} = 0$



✓ 分布の仕方は nn 相関にあまり  
依らない (ただし絶対値は変化)

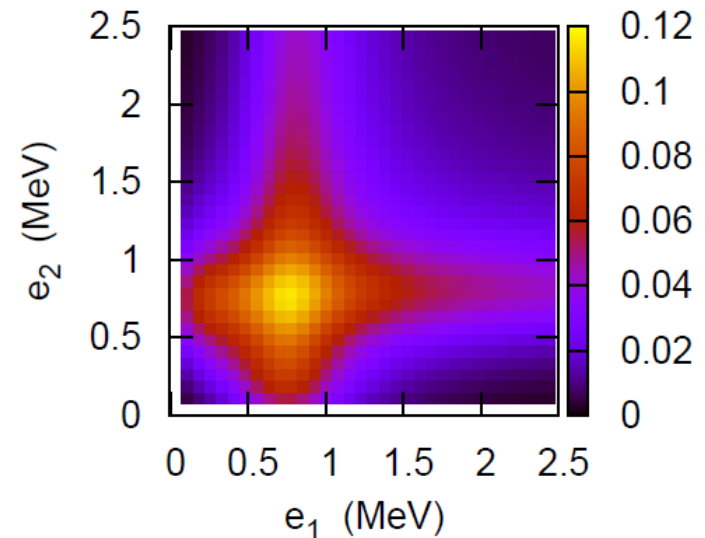
✓  $V_{nC}$  の性質に大きく依存

✓  ${}^{11}\text{Li}$  でも  ${}^6\text{He}$  でも同様



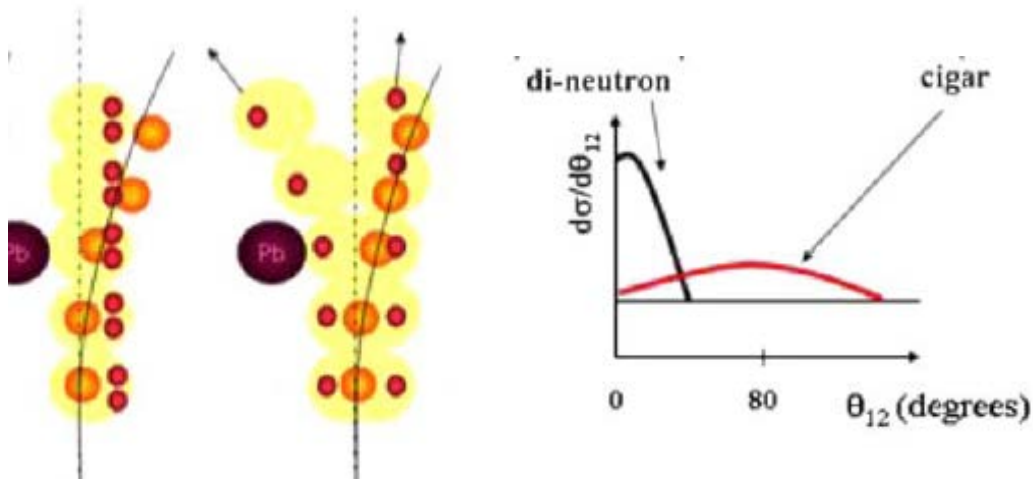
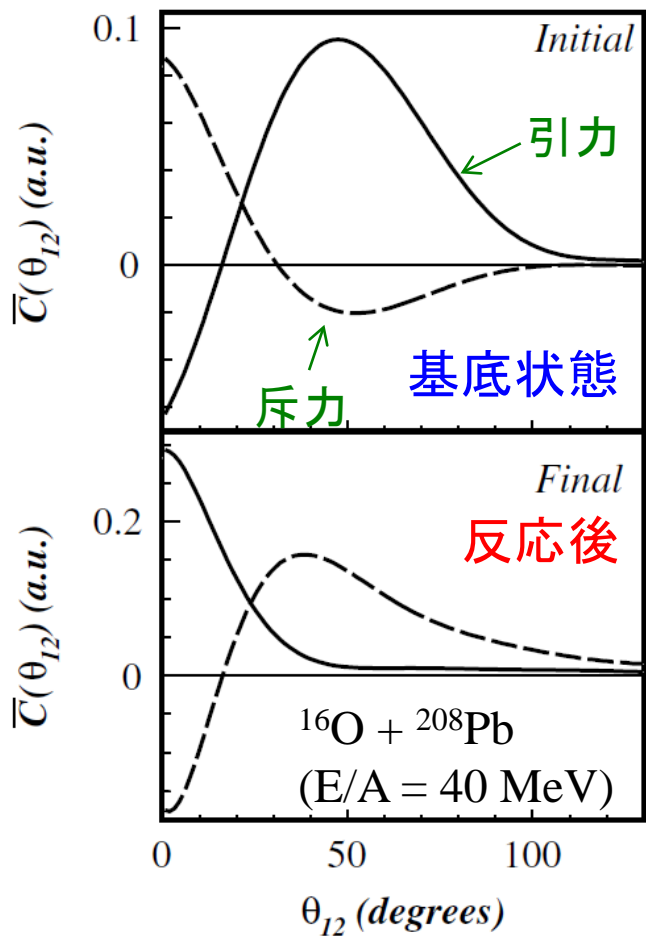
クーロン分解は2段階過程

基底状態: di-neutron 相関なし  
(odd-1 のみ) の場合

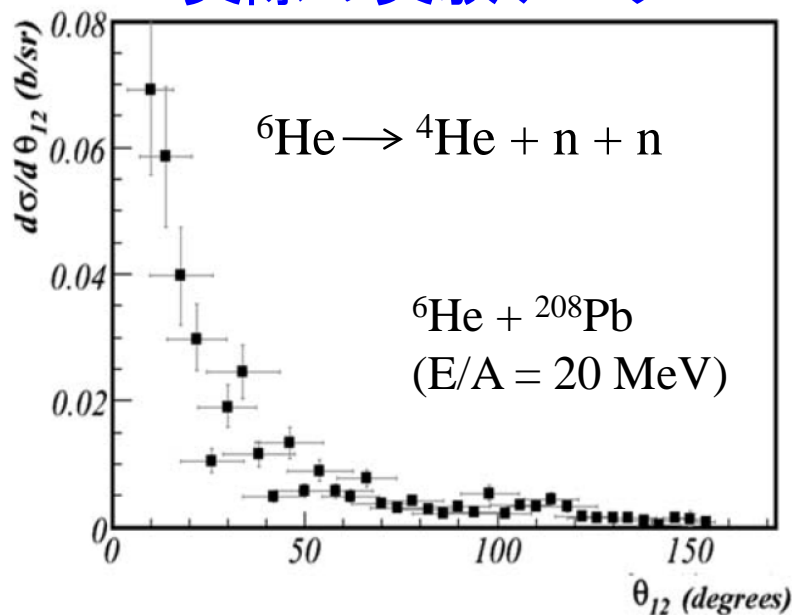


# 核力分解

TDDM法による運動量  
相関関数  $C = \rho_{12} - \rho_1 \rho_2$



## 実際の実験データ

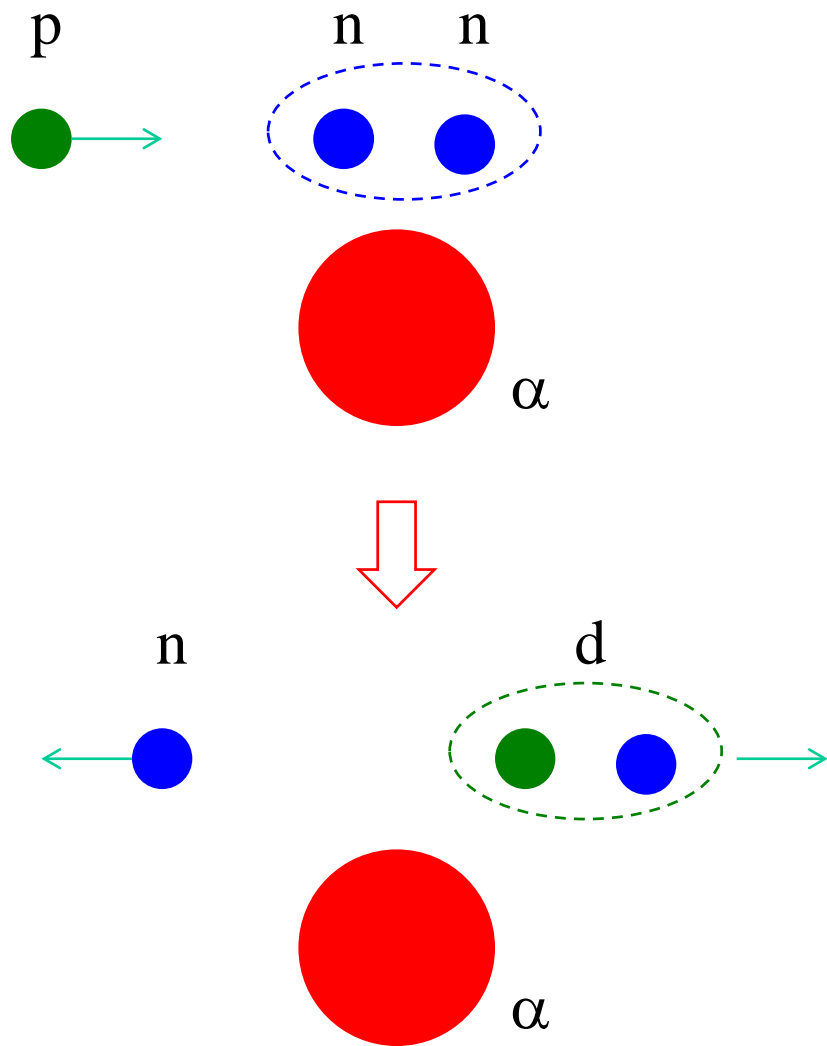


M. Assie et al., Eur. Phys. J. A42 ('09) 441

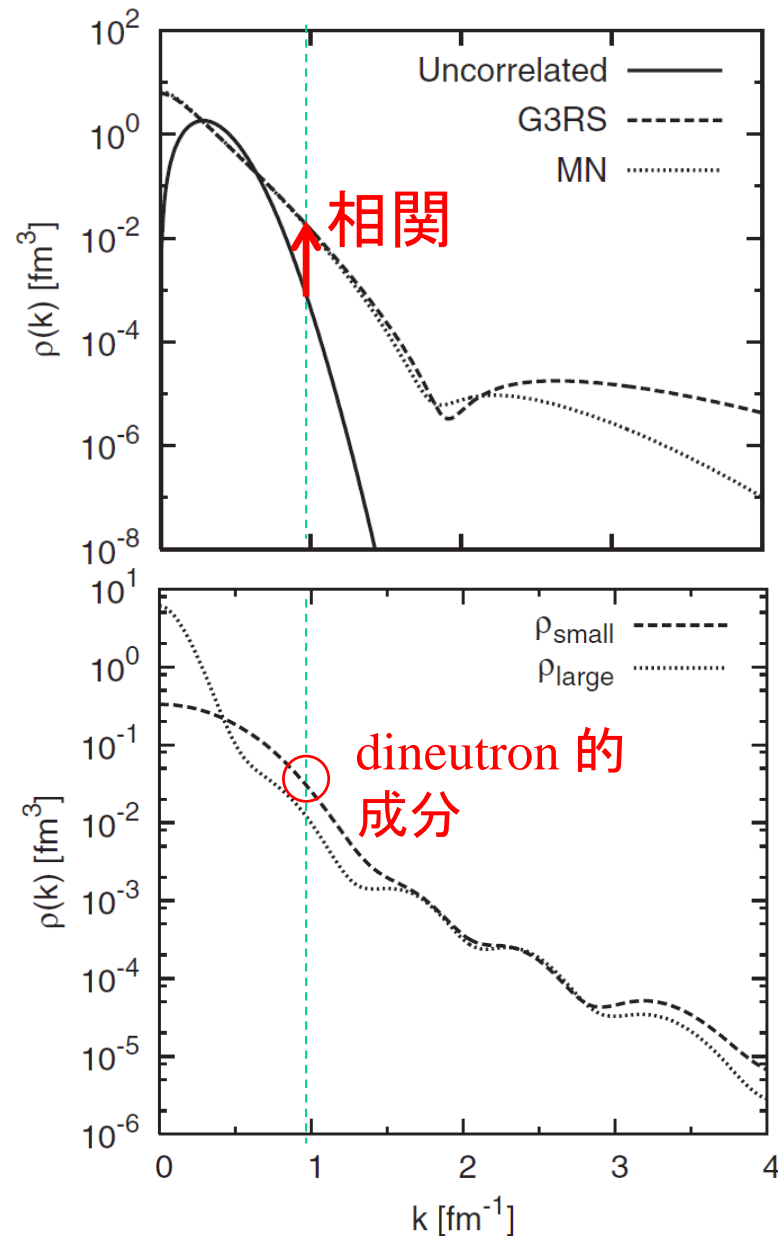
Assie, Lacroix, PRL102('09)202501

\* 4体CDCC計算?

# nn 間の運動量分布を直接見る? : (p,d) 後方散乱

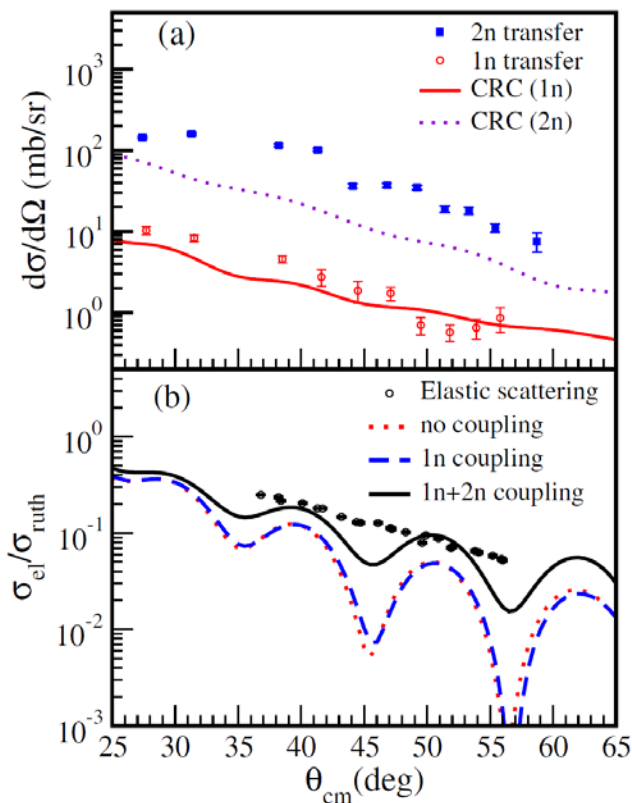


実験: 須田利美氏  
(データ解析中)



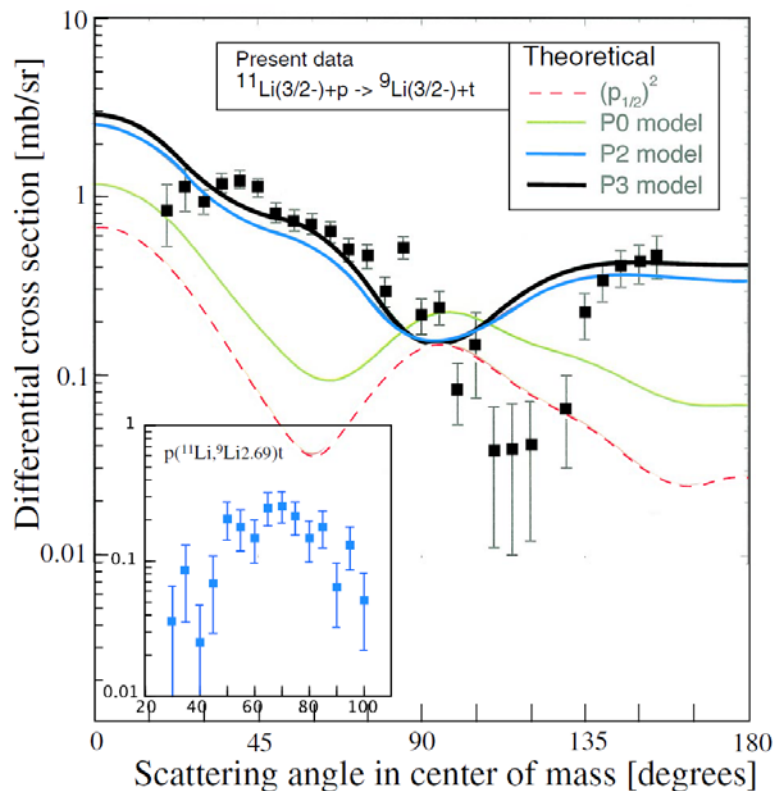
# 対移行反応

${}^6\text{He} + {}^{65}\text{Cu}$



A. Chatterjee et al.,  
PRL101('08)032701

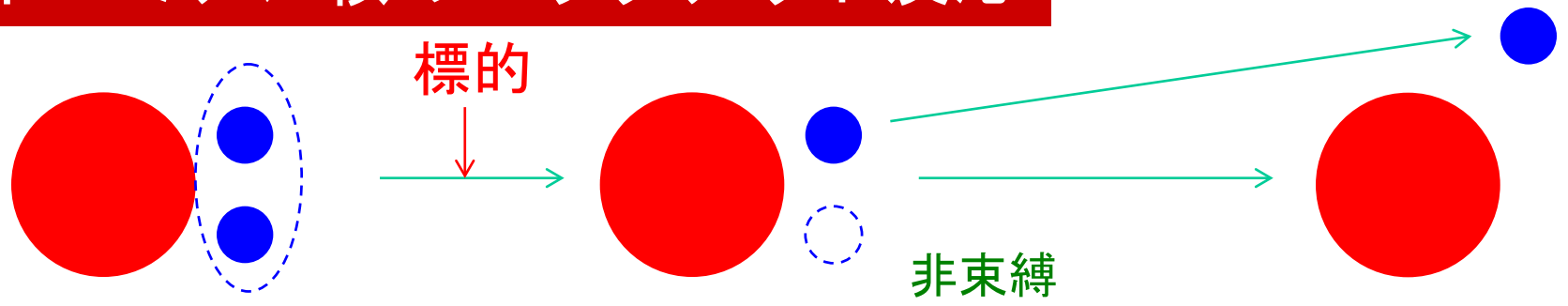
${}^1\text{H}({}^{11}\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^3\text{H}$



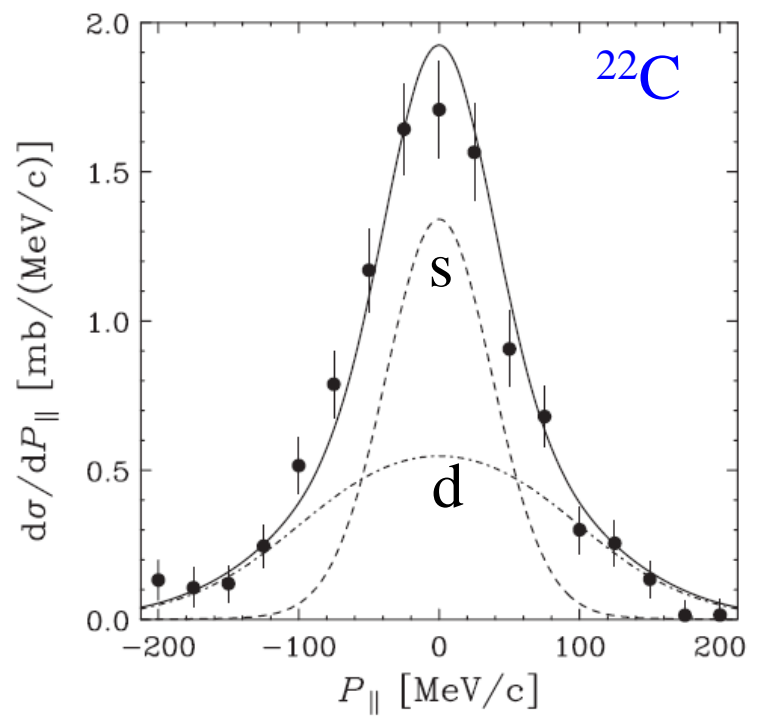
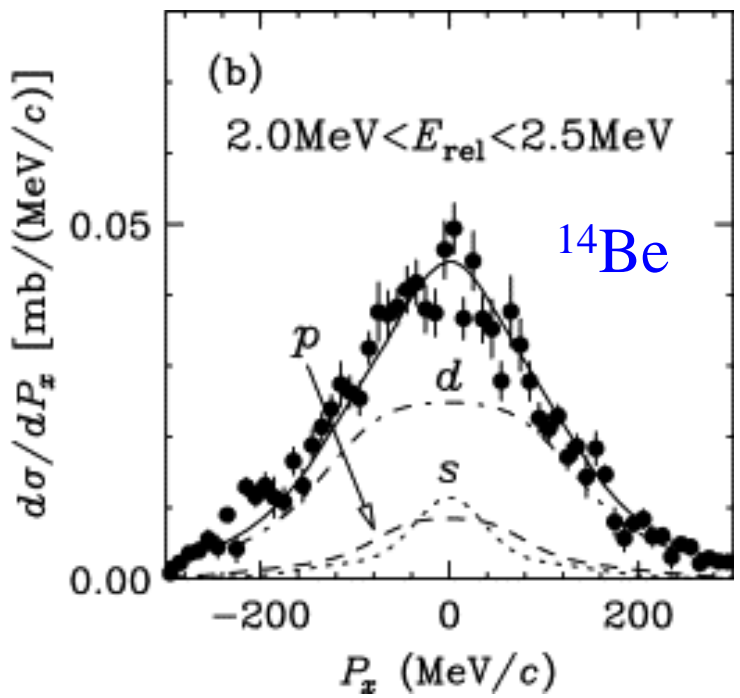
I. Tanihata et al.,  
PRL100('08)192502

- ✓ 対相関に敏感
- ✓ di-neutron 相関との関係はこれからの課題
- ✓ 中間状態の束縛性の影響

# ボロミアン核のノックアウト反応



3体の基底状態はどのようなcore-n  
角運動量状態から構成されるのか?

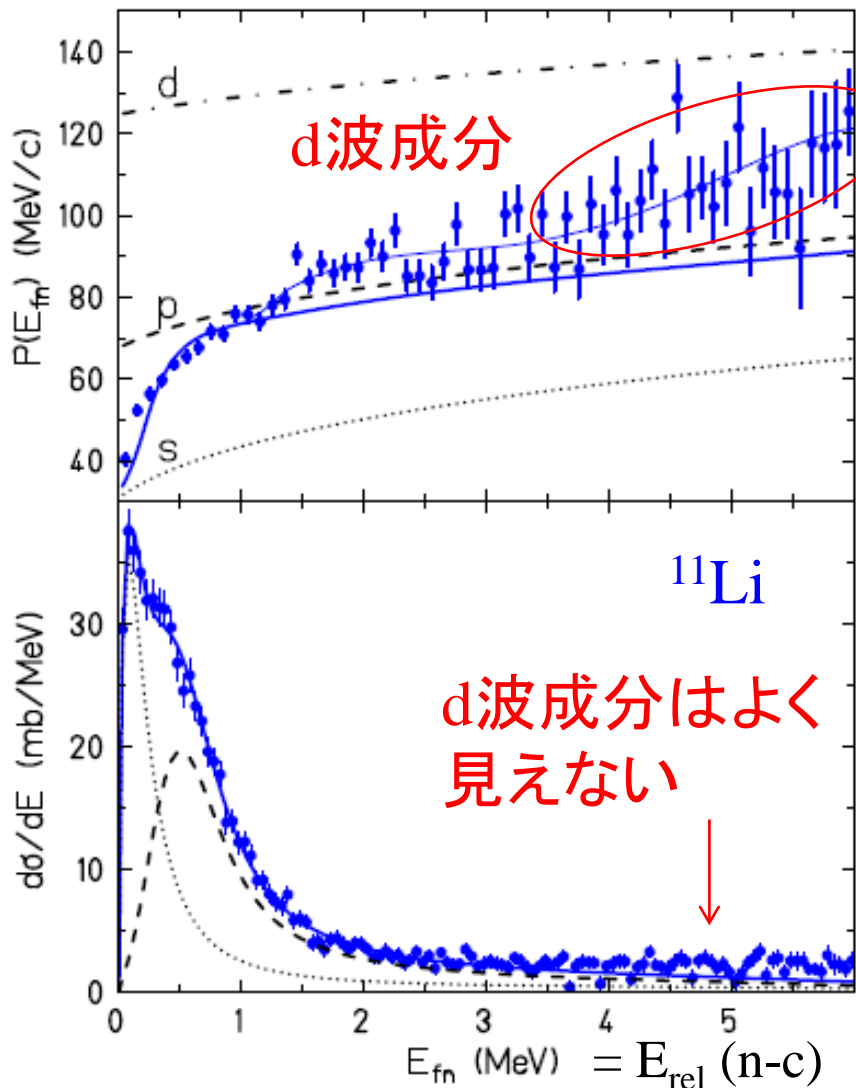


Y. Kondo et al., PLB690('10)245

N. Kobayashi et al., PRC86('12)054604

# 運動量分布の幅

$$P(E_{fn}) = \sqrt{\langle p_{c+n}^2 \rangle - \langle p_{c+n} \rangle^2}$$

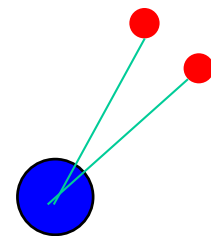


**\* より高い角運動量成分は見えるか?**

di-neutron 相関  $\leftrightarrow$  高い  $l$  の混じり

## 3体模型計算

$(s_{1/2})^2$	20.6 %	$(p_{3/2})^2$	2.2 %
$(p_{1/2})^2$	59.8 %	$(d_{5/2})^2$	12.6 %
$(d_{3/2})^2$	2.9 %	$(f_{7/2})^2$	0.92 %
$(f_{5/2})^2$	0.40 %	$(g_{9/2})^2$	0.18 %
$(g_{7/2})^2$	0.12 %	$(h_{11/2})^2$	0.056 %
$(h_{9/2})^2$	0.046 %		



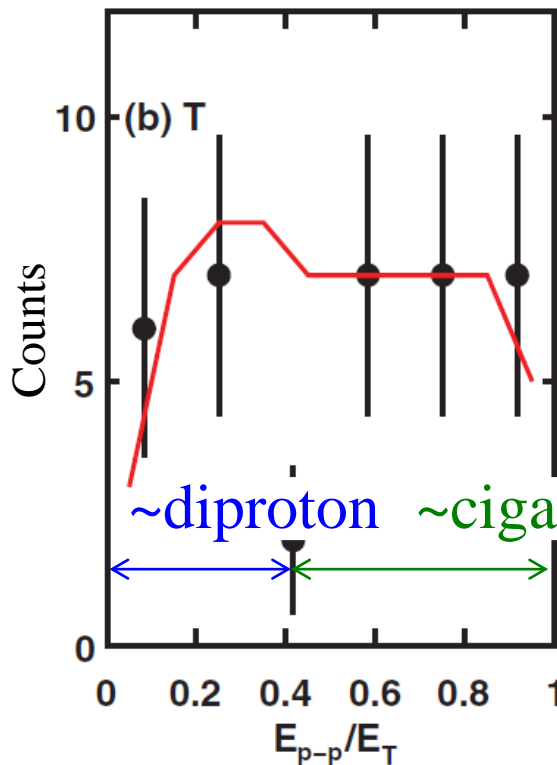
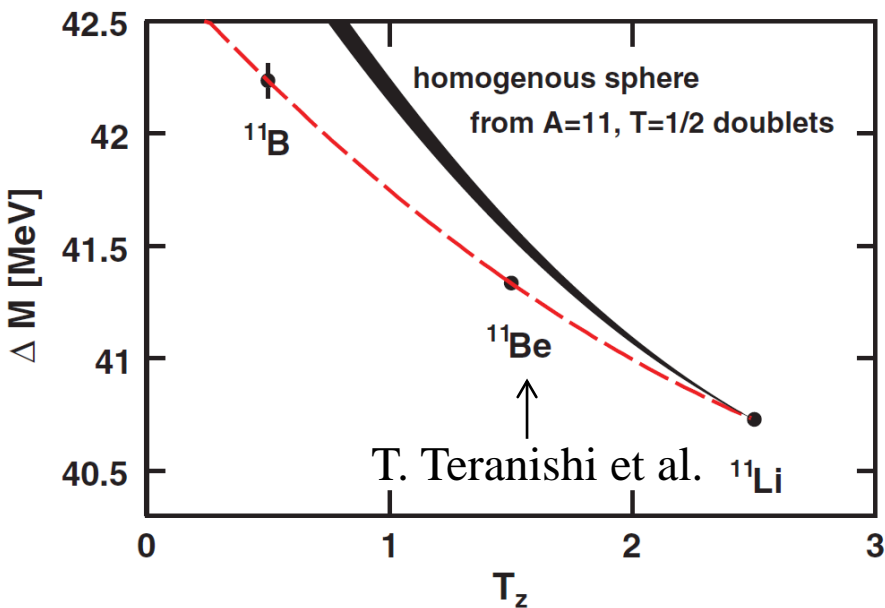
SAMURAI での測定?

# 2核子放出崩壊

$^{11}\text{Li}$  の2重アイソバリック・アナログ状態  
 ( $^{11}\text{B}$ :  $T = 5/2, T_z = 1/2$ )



放出 2p のエネルギー・相関



cf.  $^6\text{Be}$  の解析  
 L.V. Grigorenko  
 et al., PRC80  
 ('09) 034602

$^{11}\text{Li}$ : dineutron  
 成分と cigar 成  
 分は同程度

↓  
 3体模型計算:  
 di-neutron 51%

3体模型計算:

$$\Delta E(^{11}\text{Be}_{\text{IAS}} - ^{11}\text{Li}) = 1.375 \text{ MeV}$$

$$\Delta E(^{11}\text{B}_{\text{DIAS}} - ^{11}\text{Be}_{\text{IAS}}) = 1.80 \text{ MeV}$$

Expt. 1.389(20) MeV

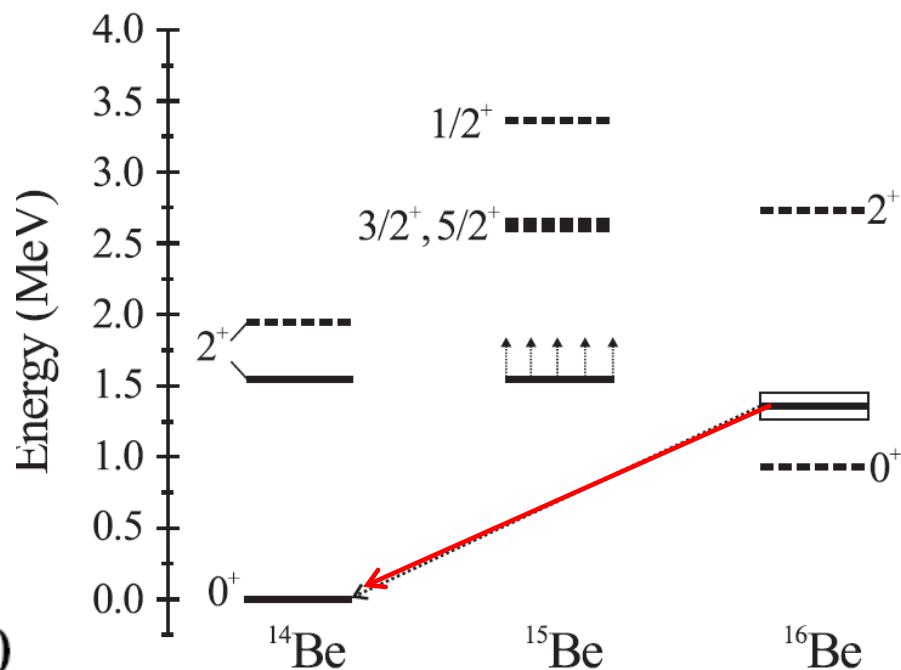
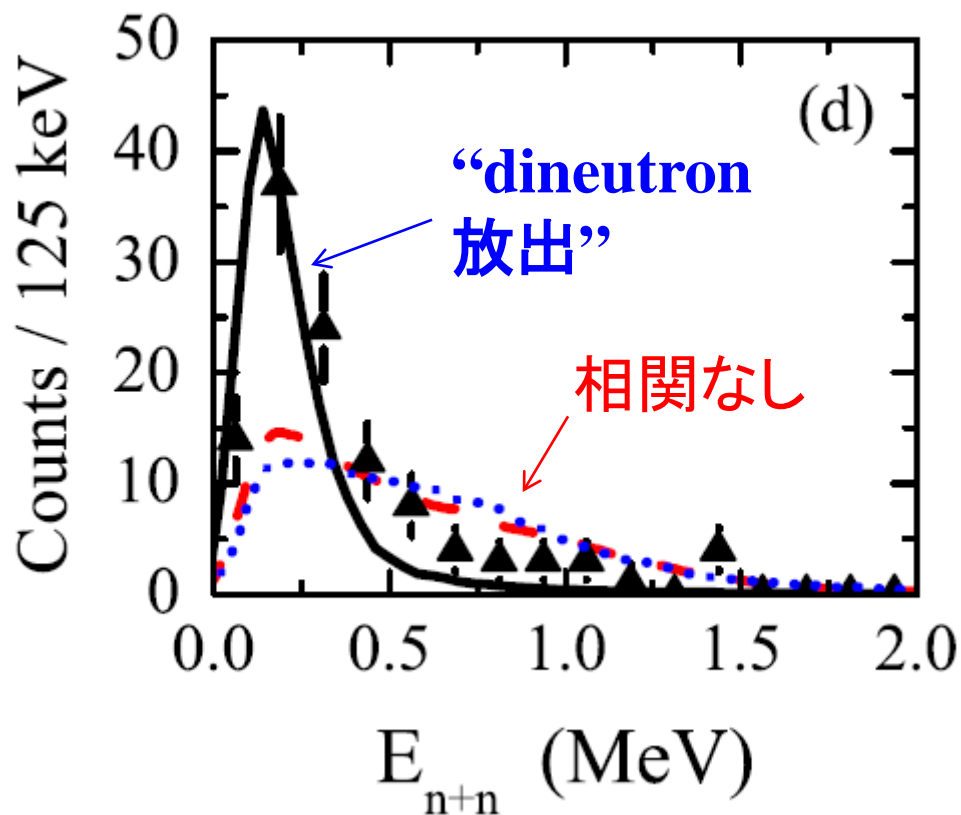
1.69(8) MeV

R.J. Charity, L.G. Sobotka, K.H., et al., PRC86('12)041307(R)

cf.  $^6\text{Be}$  の2陽子崩壊: 大石知広 (26pHA5)



## 2中性子放出 (MoNA @ MSU)



A. Spyrou et al., PRL108('12) 102501

## 他にも

$^{13}\text{Li}$  (Z. Kohley et al., PRC87('13)011304(R))       $^{14}\text{Be} \rightarrow ^{13}\text{Li} \rightarrow ^{11}\text{Li} + 2n$

$^{26}\text{O}$  (E. Lunderbert et al., PRL108('12)142503)       $^{27}\text{F} \rightarrow ^{26}\text{O} \rightarrow ^{24}\text{O} + 2n$

nn 相関を取り入れた3体模型計算が喫緊の課題

# まとめ

di-neutron 相関: 2中性子分布の空間的局在化

✓パリティ混合

✓中性子過剰核: 連続状態への散乱

核表面での対相関の増大

どのようにプローブするか?

• クーロン分解 (T. Nakamura et al.)

✓相関による $B(E1)$ 強度の増大

✓クラスター和則 (基底状態の相関のみが関与)

✓2中性子間の開き角

• 核力分解

• 2中性子間の運動量分布

• 2中性子移行反応

• ノックアウト反応

• 2中性子放出崩壊

SAMURAIでの多重粒子測定実験に期待